

22^e Conférence du COLUMA
Journées Internationales sur la Lutte contre les Mauvaises Herbes
10, 11 et 12 décembre 2013 – Centre de Congrès de Dijon

22nd COLUMA Conference
International Meeting on Weed Control
December, 10, 11 and 12, 2013 – Dijon Convention Center (France)

La 22^e Conférence du COLUMA de l'AFPP a été organisée avec le concours de :



Et avec le soutien du fonds Pascal du ministère de la Culture et de la Communication – Ce fonds de soutien à l'interprétation doit permettre aux chercheurs de communiquer en langue française le résultat de leurs travaux :



AFPP – 22^e CONFÉRENCE DU COLUMA
JOURNÉES INTERNATIONALES SUR LA LUTTE CONTRE LES MAUVAISES HERBES
DIJON – 10, 11 ET 12 DÉCEMBRE 2013

CANNE A SUCRE, HERBICIDES ET POLLUTION DES EAUX A LA REUNION :
BILAN ET PERSPECTIVES AU TERME DE LA PREMIERE DECENNIE DE SUIVI

J. MARTIN ⁽¹⁾, V. PETIT ⁽²⁾, B. AUNAY⁽³⁾, C. LUCAS ⁽²⁾, L. MAILLARY ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ CIRAD, UR SCA, Saint-Denis, La Réunion, jose.martin@cirad.fr

⁽²⁾ BRGM, Saint-Denis, La Réunion, v.petit@brgm.fr

⁽³⁾ BRGM, Saint-Denis, La Réunion, b.aunay@brgm.fr

⁽⁴⁾ DAAF, SALIM, Projet ECOPHYTO, Saint-Pierre, La Réunion, ludovic.maillary@agriculture.gouv.fr

RESUME

A La Réunion, les pesticides sont recherchés dans les eaux douces depuis 1999. Le BRGM a compilé des données de l'Office de l'eau, de l'Agence Régionale de Santé et de la Direction de l'Environnement couvrant 247 points d'eau entre mai 1999 et janvier 2010. Les recherches ont été positives sur 55% des points d'eau. Parmi les 398 substances recherchées, 72 ont été détectées et 65 quantifiées, parmi lesquelles 34 herbicides ou leurs métabolites, dont 17 liés au désherbage de la canne à sucre. Le nombre de dépassements du seuil de potabilité (0,1 µg/l) par substance s'élève à 251 pour 1811 détections, dont 1406 avérées (quantifiées). Les herbicides canne, glyphosate inclus, ont causé 82 % des dépassements. Deux anciens herbicides d'utilisation massive en canne, l'atrazine et le diuron, ont causé 80 % des pollutions avérées et 67 % des dépassements. Quelques dépassements sont dus à quatre herbicides encore en usage : ils sont testés en laboratoire sur des sols réunionnais en vue de déterminer leur potentiel de pollution diffuse dans le cadre du projet 'Transfert Phytos' porté par le BRGM Réunion.

Mots-clés : ressources en eau - pollution - herbicides - canne à sucre - La Réunion.

ABSTRACT

SUGARCANE, HERBICIDES AND WATER POLLUTION IN REUNION ISLAND: ACHIEVEMENTS AND PERSPECTIVES AFTER TEN YEARS OF MONITORING

In Reunion Island, water resources have been monitored for pesticides pollution since 1999. The BRGM, the French geological and hydrogeological survey, compiled data from three local agencies involved in water quality. The compilation included data from 247 sites monitored between May 1999 and January 2010. Positive results were found in 55% of the sites. Among the 398 substances checked, 72 were found and 65 were quantified: 35 of them were herbicides or herbicide degradates, and 17 were involved in sugarcane weeding. 1,811 results were positive, 1,406 results were quantified and 251 results had concentrations over the drinking water threshold (0.1 ppb). Sugarcane herbicides, including glyphosate, were responsible for 82% of the results over 0.1 ppb. Two sugarcane herbicides widely used in the past, atrazine and diuron, were responsible for 80 % of the quantified results and 67 % of the results over 0.1 ppb. Four herbicides currently in use have been found at concentrations over 0.1 ppb. They are being tested in laboratory by the BRGM in order to assess the pollution risks for groundwater when applied on some native soils.

Keywords: water resources – pollution - herbicides - sugarcane – Reunion Island.

INTRODUCTION

La canne à sucre, culture mineure au plan national français et *a fortiori* européen, est une culture importante dans les trois départements insulaires français d'outre-mer (Guadeloupe, Martinique, Réunion). La Réunion est la principale île à sucre française : environ 24 500 ha de canne à sucre actuellement, soit 57% de la surface agricole utile du département (DAAF de La Réunion, 2012). Culture pérenne structurant les paysages, la canne à sucre protège les sols contre l'agressivité érosive des fortes précipitations et des cyclones (hormis une période de vulnérabilité de quelques mois à la plantation). Elle passe pour une culture une relativement 'propre', car en dehors des herbicides, elle consomme très peu de produits phytopharmaceutiques ('pesticides' par la suite). Les déclarations de ventes de pesticides au titre de la redevance pour pollutions diffuses entrées en vigueur à La Réunion en 2010 ont permis de dresser un premier état des lieux sur les ventes de pesticides. Moyenne annuelle pour les années 2009, 2010 et 2011 (Martin *et al.*, 2013 a): 193 pesticides importés, dont 55 herbicides, dont 11 dédiés essentiellement ou partiellement au désherbage de la canne à sucre (par la suite, 'herbicides canne'). Physiquement, les 11 herbicides canne représentent : 120 tonnes/an de substances actives (SA), 58% du total des importations de SA pesticides, 76% de la totalité des SA herbicides. A noter que dans cette estimation, 50% des désherbants totaux utilisables en traitements généraux, pour des usages agricoles et non agricoles, ont été considérés comme dédiés à la canne. Les herbicides canne représentent une dose approximative de 5 kg/ha/an de substance active, correspondant à un IFT annuel d'environ 3,6 doses homologuées par hectare (Martin *et al.*, 2013 a).

Les herbicides canne actuellement utilisés résultent d'un intense chassé-croisé de retraits et d'homologations (Martin *et al.*, 2013 b). La gamme actuelle n'est pas figée, elle est toujours sujette à évolution par retraits, incorporations et requalifications. L'utilisation des herbicides en culture de canne à sucre est ancienne à La Réunion : elle remonte aux années 1950, avec déjà l'utilisation en post-levée du 2,4-D, et d'autres produits compagnons hors d'usage depuis assez longtemps. Les produits de pré-levée, à base de diuron et d'atrazine notamment, firent leur apparition dans la décennie suivante dans les grands domaines. L'utilisation des herbicides se généralisa progressivement dans les années 1970, comme en témoigne le manuel « Les principales adventices de la canne à la Réunion », édité en 1977 avec déjà 14 prescriptions de produits (Boyer de la Giroday, 1977). Cette évolution historique est retracée dans ses grandes lignes et en termes qualitatifs dans Martin & Esther (2013), qui présentent des voies d'optimisation de l'utilisation des herbicides canne susceptibles d'apporter des progrès en matière d'impact pour l'environnement.

Les impacts de l'utilisation des pesticides (usages agricoles et non agricoles) sur la qualité des eaux douces et marines sont désormais bien documentés. La redevance perçue par l'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques) sur les ventes de pesticides au titre des pollutions diffuses vient d'ailleurs en application nationale de la DCE (directive-cadre sur l'eau) adoptée au niveau européen en 2000 avec comme objectif d'atteindre en 2015 un 'bon état' des ressources hydriques. Concrètement une approche par BAC (bassins d'alimentation de captage) a été retenue, avec 500 BAC prioritaires au niveau national, soit 5 par département (les plus problématiques).

La Réunion est sans doute dans l'absolu un département moins touché par les problèmes de pollution des ressources en eau (notamment en nitrates), mais les enjeux de qualité de l'eau y sont exacerbés, en raison du confinement sur le « caillou » d'intenses activités urbaines et rurales très étroitement imbriquées. Exemple d'enjeu environnemental : la qualité des eaux des petits lagons de la côte occidentale est directement impactée par la qualité des eaux de surface (rivières et ravines à écoulement temporaire) ; or la plupart des SA des herbicides canne sont classées N (dangereuses pour l'environnement), en l'occurrence « *très toxiques pour les organismes aquatiques, pouvant entraîner des effets néfastes à long terme pour l'environnement aquatique* » (phrase de risque R50/53). Exemple d'enjeu sanitaire : la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, provenant des eaux de surface ou souterraines, utilisables directement ou après assainissement

selon leur état. En dessous de 0,1 µg/l par substance individualisée et de 0,5 µg/l pour le cumul des substances quantifiées, elles sont directement distribuables au robinet, au dessus elles doivent être assainies, à condition qu'elles ne dépassent pas 2 µg/l par substance et 5 µg/l pour le cumul (observatoire-pesticides.gouv.fr).

A La Réunion, les factures d'eau sont accompagnées d'un dépliant rappelant au consommateur les efforts déployés pour assurer la qualité de l'eau potable. La charge en pesticides n'est qu'un critère de qualité au sein d'une batterie qui comprend la bactériologie, la turbidité, la dureté, la charge en nitrates, la charge en métaux (plomb, aluminium, autres) et la charge en solvants chlorés. Avec les nitrates et les pesticides, l'agriculture est en première ligne. A La Réunion, le désherbage chimique de la canne fut classé comme premier problème phytosanitaire local lors de l'élaboration du plan ECOPHYTO qui, dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, promeut une moindre et meilleure utilisation des pesticides. Pour la canne à sucre, en sus de la voie du développement de méthodes alternatives (Grossard *et al.*, 2012), l'optimisation de l'utilisation des herbicides restera une voie importante dans l'amélioration des performances agronomiques et technico-économiques, sanitaires et environnementales des trois filières canne à sucre françaises (Côte *et al.*, 2011), et de la filière réunionnaise en particulier (Martin & Esther, 2013).

Dans le cadre du projet 'Pollution diffuse et transfert des produits phytosanitaires du sol vers les ressources en eaux souterraines de l'île de La Réunion', dit 'Transfert Phytos', le BRGM Réunion a compilé les résultats de la première décennie de recherche de pesticides et de leurs produits de dégradation (par la suite 'métabolites') dans les eaux souterraines (ESO) et superficielles (ESU), à savoir ceux de l'ARS (Agence Régionale de Santé, ex DRASS-DDASS) et des partenaires du projet : l'OLE (Office de l'eau - Réunion, ex ORE Observatoire Réunionnais de l'Eau) et la DEAL (Direction de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement, ex DIREN) (Petit *et al.*, 2013).

LA TRAQUE AUX PESTICIDES DANS LES EAUX DOUCES A LA REUNION DEBUTE AVEC LE MILLENAIRE

C'est l'OLE qui initia la traque aux pesticides dans les eaux douces en mai 1999, les campagnes d'analyses physico-chimiques ayant débuté en 1992 sur 49 points d'eau. L'ARS, soucieuse de la qualité sanitaire des eaux destinées à la consommation humaine, fit de même à partir de fin 2000, sur 203 points d'eau. La DEAL soucieuse de la qualité des eaux de surface de 13 sites particuliers est le troisième acteur.

La compilation 'Transfert phytos' porte *in fine* sur un total de 384 627 résultats d'analyses de recherche de pesticides. Ce nombre regroupe la totalité des analyses OLE-DEAL et une partie des analyses ARS, celles ayant donné un résultat positif. L'absence des analyses ARS ayant donné des résultats négatifs empêche de calculer les taux absolus de positivité à une substance donnée. La période couverte va jusqu'en 2009 inclus pour l'OLE et la DEAL avec environ un quart des analyses et jusqu'en janvier 2010 pour l'ARS avec environ trois quarts des analyses compilées.

Avec 18 points d'eau communs à l'ARS et à l'OLE, le nombre total de points de prélèvements s'élève à 247, environ trois quarts ARS et un quart OLE-DEAL. Ceux de l'ARS concernent presque pour trois quarts les ESO alors que ceux de l'OLE-DEAL concernent presque pour moitié les ESU. Globalement, deux tiers des points d'eau et des analyses concernent les ESO. Lors de la compilation, les limites de quantifications (LQ) des SA, susceptibles d'évolution au cours de la décennie ou entre laboratoires, n'ont pas été relevées de manière exhaustive. Certaines substances ont été 'détectées' sans quantification, alors qu'au sens de la DCE une substance est considérée 'présente' si et seulement si elle a été quantifiée : pollution 'avérée'. Par la suite, le terme d'analyses 'positives' et de substances 'détectées' englobe l'ensemble des substances quantifiées et détectées sans quantification. Certaines SA présentent pour cette période des taux de détections non quantifiées beaucoup plus importantes que la moyenne (par exemple l'hexazinone et le bromacil).

Côté ARS, 43,8 % des points d'eau ont été positifs au moins une fois à un pesticide (ou métabolite) détecté ou quantifié, alors que côté OLE-DEAL ce taux monte à 80,6 % (55% globalement).

Le tableau I dresse la liste des 72 substances détectées (métabolites compris) – dont 65 présentes au sens de la DCE - au terme de 89 675 analyses, valeurs à rapprocher du cumul de 398 substances recherchées et d'un nombre d'analyses supérieur aux 384 627 analyses regroupées dans cette première compilation décennale (les analyses négatives de l'ARS n'y figurent pas). Le tableau I fait également état de 1811 analyses positives, dont 1 406 cas de présence avérée de pesticides et 250 cas de dépassement du seuil de potabilité de 0,1 µg/l. Ces résultats sont restitués graphiquement, toutes substances confondues, par les cartes de la figure 1 : 1-A pour les détections, 1-B pour les dépassements du seuil de 0,1 µg/l (par la suite 'dépassements').

Que ce soit pour les ESO ou les ESU, ces cartes font apparaître les sites où les cas de pollution sont récurrents et ceux où ils sont occasionnels. La carte des détections (figure 1-A) met clairement en évidence les zones les plus exposées : la bordure Nord-est (de Sainte-Rose à Sainte-Marie), et une partie de la bordure Sud-est (entre Saint-Leu et Saint-Pierre).

La carte des dépassements (figure 1-B) signale une trentaine de sites victimes de pollutions occasionnelles, ainsi que la dizaine de sites victimes de pollutions plus fréquentes voire chroniques notamment au-dessus de Saint-Pierre (BAC de la Salette) et de Sainte-Suzanne (BAC de Sainte-Vivienne) avec plus de 20 dépassements sur la décennie (pour une fréquence de 4 prélèvements annuels en principe), et dans une moindre mesure Sainte-Anne (moins de 20 dépassements sur la décennie).

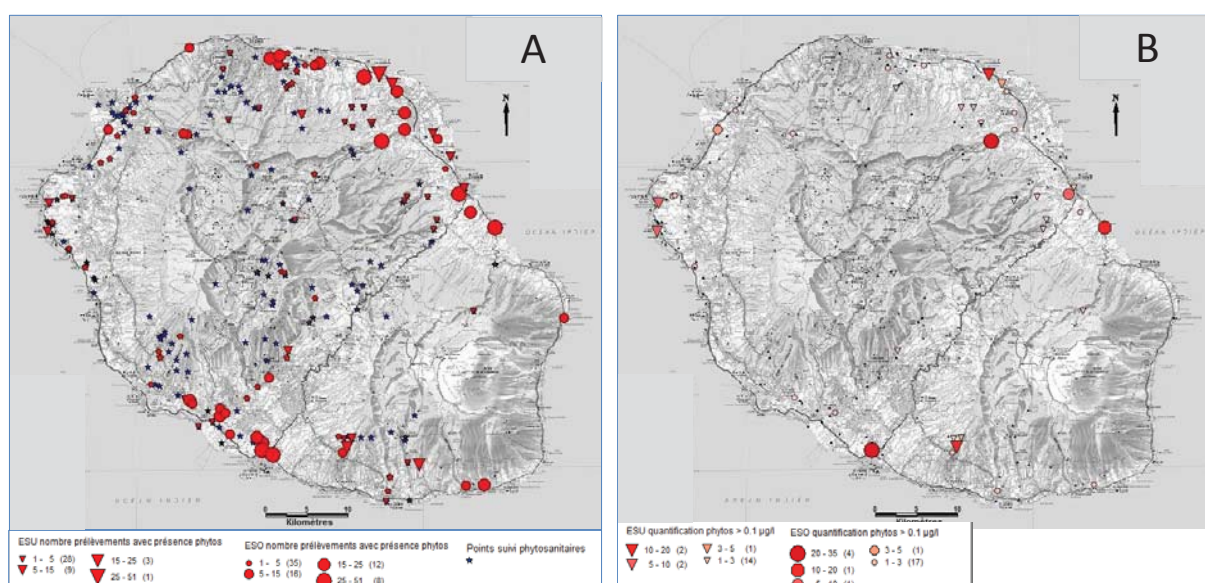
Certains de ces points ESO sont pollués par plusieurs substances à la fois avec quelques cas de dépassement du seuil de 0,5 µg/l pour la somme des concentrations : 4 occurrences sur Saint-Benoît et Sainte-Anne. Toujours sur la côte Est, entre Bras-Panon et Sainte-Suzanne, les ESU ont connu en 2007 des pics de pollution très intenses, avec des sommes de concentrations atteignant 10 à 20 fois la valeur seuil. Ces niveaux de pollution exceptionnels sont à relier aux fortes pluies à répétition survenues au cours du premier semestre 2007, sans doute érosives. Cette année-là, le cyclone Gamède, plus actif sur la côte Ouest, provoqua deux occurrences de sommes de concentrations 5 et 6 fois supérieures au seuil de 0,5 µg/l. Dans le Sud, on enregistre trois cas de dépassement de ce seuil, dont deux en terrain très perméable (formations volcaniques très récentes du volcan de la Fournaise).

Figure 1. Suivi de la pollution des eaux douces par les pesticides à La Réunion, ARS + OLE + DEAL, période 1999-2010. ESU : eaux de surface, ESO : eaux souterraines.

A : Prélèvements positifs, B : Résultats > 0,1 µg/l.

Monitoring of water pollution by pesticides, Reunion Island, 1999-2010.

ESU : surface water, ESO : groundwater ; A : positive results ; B : results > 0.1 ppb.



Le tableau I indique que parmi les 72 substances détectées dans les eaux douces de La Réunion, 35 sont des herbicides ou leurs métabolites, dont 17 (soit 23,6%) principalement ou partiellement liés, actuellement ou par le passé, au désherbage de la canne. Le tableau II détaille l'incidence des 19 herbicides ayant causé directement ou via leurs métabolites des dépassements du seuil de 0.1 µg/l ; ils sont à eux seuls responsables des 94% des pollutions avérées et de 87% des dépassements. Il s'ensuit que les 6% des pollutions avérées restant sont causés par d'autres pesticides en bien plus grand nombre (50 substances). Les 10 herbicides canne ou partiellement canne ont causé 89% des pollutions avérées et 80% des dépassements.

LES SEQUELLES DE QUELQUES HERBICIDES DE LA VIEILLE GARDE CANNE A SUCRE ...

Les deux cas de dépassements les plus fréquents concernent deux anciens herbicides massivement utilisés en canne à sucre, l'atrazine - retirée en 2003 - et le diuron - retiré en 2008 : avec leurs métabolites, ils sont responsables de 80% des cas de pollution avérée ou de 66,5% des cas de dépassements du seuil de potabilité (0.1 µg/l) (Tableau II). Le glyphosate, dont on considère à défaut de meilleure estimation qu'il serait utilisé pour moitié sur canne à sucre (Martin *et al.*, 2013a), vient en troisième position avec une contribution de 1,8% aux pollutions avérées qui s'élève à 6,4% des cas de dépassements des seuils. Ces 3 herbicides sont donc responsables à eux seuls des quatre cinquième des cas de pollution avérée et des trois quarts des cas de dépassement du seuil de potabilité au cours de la décennie (tableau II).

Les cas de dépassements du seuil de potabilité rapportés aux cas de présence avérée donnent un ratio moyen de 18% pour l'ensemble des pesticides et de 16% pour l'ensemble des herbicides ou les herbicides canne (tableau II). Ce ratio cache néanmoins des variations importantes : 6% pour le métolachlore, 8% pour le diuron, 16% pour l'atrazine, 20% pour l'hexazinone et 85% pour le glyphosate. Il y a 6 cas de ratios à 100% mais ils concernent des produits qui n'ont été présents qu'une à trois fois au plus en dix ans.

Parmi les 9 herbicides ayant dépassé au moins deux fois le seuil critique, 5 sont liés à la canne à sucre depuis longtemps (Martin *et al.*, 2013 b). L'hexazinone (7 dépassements) et le bromacil (2 dépassements) sont retirés depuis assez longtemps (respectivement 2007 et 2003). Le 2,4-D et la métribuzine (2 dépassements chacun) sont des produits historiques toujours en usage et appréciés des planteurs (Martin *et al.*, 2013 b). Le 2,4-D est actuellement responsable à lui seul de la moitié de l'IFT herbicides canne à sucre à La Réunion, Martin *et al.*, 2013 a), et il est fort probable que ce produit ait été au premier rang des herbicides canne à La Réunion depuis les débuts du désherbage chimique (six décennies). La fréquence des pollutions au 2,4-D peut donc être considérée comme faible en considération du niveau d'exposition des sols agricoles à ce produit appliqué en post-levée.

Les deux cas de pollution au métolachlore (50 détections, 32 présences avérées, 2 dépassements) peuvent être imputés soit au métolachlore retiré en 2003 soit au S-métolachlore en jeu depuis 2004 et surtout 2006 avec une formulation plus utilisée (Martin *et al.*, 2013 b et Martin *et al.*, 2013 a). Le S-métolachlore est une formulation concentrée à plus de 80% en isomère S, l'isomère R n'ayant pas d'activité herbicide. Le remplacement du métolachlore (mélange à parts égales des deux isomères) par le S-métolachlore a permis de réduire drastiquement les doses d'emploi. L'origine ancienne (métolachlore *sensu stricto*) ou récente (S-métolachlore) des pollutions au métolachlore (*sensu lato*) ne peut pas être déterminée par ces analyses.

Parmi les 7 herbicides ayant dépassé une seule fois le seuil, il n'y a plus d'herbicide exclusivement dédié au désherbage de la canne. Deux herbicides pouvaient néanmoins être utilisés par les planteurs de canne : le paraquat (interdit depuis 2007) sur des usages de type glyphosate (préparation du terrain avant la plantation, ou associé aux herbicides de pré-levée, ou en traitement dirigé au pied des cannes en post-levée) : le triclopyr, débroussaillant homologué sur prairies ou en traitements généraux des chemins et bordures, totalement sélectif des graminées, parfois utilisé pour dévitaliser les pérennes en bordure des champs, ou parfois même au sein de plantation en traitements localisés.

Tableau I. Les pesticides dans les eaux douces (ESU + ESO) à La Réunion, période 1999-2010.
Pesticides found in water, Reunion Island, 1999-2010.

#S	#H	#CAS	Substances phytosanitaires détectées ou quantifiées	Nombre d'analyses	Nombre de détectations non quantifiées	Nombre de quantifications ≤ 0.1 µg/l	Nombre de quantifications > 0.1 µg/l	pour les herbicides, principaux usages	statut ou année de retrait (*)
1	1	1	<u>déséthylatrazine (DEA)</u>	1748	66	525	150	<u>métabolite de l'atrazine</u>	
2	2	2	<u>diuron</u>	2012	43	136	15	<u>ex CAS</u>	2008
3	3	3	glyphosate	1054	0	1	9	TTG, CAS et al.	autorisé
4	4	4	acide aminométhylphosphonique (AMPA)	1054	0	2	8	métabolite du glyphosate	
5	5	5	hexazinone	1765	74	28	7	ex CAS	2007
6			DDE-4,4'	1148	0	0	6		
7			diazinon	1852	3	9	5		
8			DDD-4,4'	1150	0	0	5		
9			DDT-4,4'	1505	0	0	5		
10	6	6	bentazone	1549	14	13	4	maïs, prairies, pois, aromates ; testée CAS	autorisé
11			endosulfan alpha	1901	0	0	4		
12	7	>>	2,4-MCPA	1417	0	0	3	TTG, prairies, gazons	autorisé
13			endosulfan beta	1902	0	0	3		
14	8	7	<u>atrazine</u>	1984	79	271	2	<u>ex CAS</u>	2003
15	9	8	métolachlore / S-métolachlore	1796	18	30	2	(ex CAS) + in CAS	autorisé
16	10	9	bromat	1417	25	5	2	ex CAS	2003
17	11	10	2,4-D	1770	3	13	2	CAS	autorisé
18	12		métazachlore	1503	7	4	2	chou, tournesol ; testée CAS	autorisé
19	13		aminotriazole	364	0	3	2	TTG, fruitiers, arbres et arbustes, maïs	autorisé
20	14	11	métribuzine	1059	0	0	2	ex + in CAS	autorisé
21	15	(12)	triclopyr	1547	1	7	1	TTG, prairies (désherbage)	autorisé
22			cyprodinil	1149	3	3	1		
23	16		monuron	1061	1	3	1	asperge, vigne	1994
24	17		isoproturon	1635	1	3	1	céréales, lavande	autorisé
25			piperonyl butoxide	1096	2	1	1		
26			chlorpyrifos ethyl	1906	0	3	1		
27	18		terbutryne	1069	2	0	1	pomme de terre, pois, maïs	2003
28			tébuconazole	356	1	0	1		
29			nonylphenols	250	0	0	1		
30	19	13	paraquat	718	0	0	1	TTG, ex CAS et al.	2007
31	20		bromoxynil	1060	0	0	1	prairies, maïs ; testée CAS	
32	21		prométryne	1063	0	0	1	lentille, carotte, poireau, celeri	2007
33	22	14	<u>1-(3,4-dichlorophényl)-3-méthylurée</u>	1054	28	30	0	<u>métabolite du diuron</u>	
34	23	(15)	alachlore	1939	3	6	0	maïs ; testée CAS	2008
35	24		mécoprop	1414	2	5	0	gazon	autorisé
36			anthraquinone	977	1	5	0		
37			carbendazime	1500	4	4	0		2009
38	25		oxadiazon	1794	0	4	0	TTG, fruitiers, vigne, horticulture	autorisé
39	26		dichlorprop-p (DDP)	1060	0	3	0	TTG, forêt, prairies, gazons ; testée CAS	autorisé
40			hch gamma	935	0	3	0		
41			imidaclopride	1056	5	2	0		
42	27	16	<u>désisopropylatrazine (DIA)</u>	1067	2	2	0	<u>métabolite de l'atrazine</u>	
43	28		propyzamide	1194	1	2	0	fruitiers, vigne, forêt, légumes, horticulture	autorisé
44			mépiquat chlorure	356	1	2	0		
45			deltaméthrine	1974	0	2	0		
46			fénitrothion	1676	0	2	0		
47			fipronil	1645	0	2	0		
48			perméthrine	1097	0	2	0		
49	29	17	2,4,5-T	1062	0	2	0	ex CAS	2003
50			thiabendazole	968	0	2	0		
51			chlorométhquat chlorure	356	0	2	0		
52	30		acétochlore	976	4	1	0	maïs ; testée CAS	(2007) 2013
53	31		ethofumesate	1062	1	1	0	prairie, aromates	autorisé
54	32		imazaméthabenz	1057	1	1	0	"céréales"	2007
55	33	>>	dicamba	976	1	1	0	TTG, prairies, gazons, maïs	autorisé
56			folpel	1663	0	1	0		
57			dinitrocrésol	1572	0	1	0		
58			pentachlorophénol	1315	0	1	0		
59			DDT-2,4'	1151	0	1	0		
60			tolylfluamide	1062	0	1	0		
61			metalaxyle	1061	0	1	0		
62	34		dinoterbe	1058	0	1	0	prairies, protéagineux, maïs	1997 (France)
63			azoxystrobine	974	0	1	0		
64			endosulfan	35	0	1	0		
65			méthamidophos	8	0	1	0		
66			propoxur	1061	2	0	0		
67			téméphos	1661	1	0	0		
68			fénpropidine	1416	1	0	0		
69			procymidone	1061	1	0	0		
70	35		metoxuron	1060	1	0	0	carotte	2007
71			propiconazole	1059	1	0	0		
72			spiroxamine	634	1	0	0		
CUMULS =				87 906	405	1 156	250		
398 = NOMBRE DE SUBSTANCES RECHERCHEES									

#S: nombre de substances détectées, #H: liées aux herbicides, signalées en grisé, #CAS: liées à la canne à sucre, (x): usage CAS hors homologation, >>: usage CAS postérieur à 2010
TTG : traitements généraux ; CAS : canne à sucre, ex CAS : autrefois CAS, in CAS : actuellement CAS, CAS et al. : usage en partie lié à la CAS ; (*) *autorisé* s'entend au 25/07/2013
N.B.: les nombres d'analyses comprennent la totalité des analyses de l'OLE et de la DEAL mais uniquement les analyses positives de l'ARS.

Le dicamba (détecté 2 fois) et 2,4-MCPA (3 fois présent avec 100% de dépassements de seuil) méritent une mention spéciale, car le dicamba vient d'être homologué pour le désherbage de la canne et le 2,4-MCPA est en passe de l'être (Martin *et al.*, 2013 b). Ces cas de pollution suspectée ou avérée avec ces deux herbicides auxiniques sont sans doute liés à d'autres usages agricoles (installation de prairies de graminées) ou non agricoles (installation et entretien de pelouses, traitements généraux).

Il convient de signaler que certains herbicides de la « vieille garde » de la canne à sucre n'ont pas laissé de « séquelles » dans les eaux douces. C'est ainsi que l'ioxynil, l'amétryne et l'asulame n'ont jamais donné de résultats positifs. L'ioxynil est certes hors-jeu depuis longtemps (arrêtés préfectoraux des années 1970 et 1980). Par contre, l'amétryne est une triazine soufrée (l'atrazine étant chlorée) qui fut massivement utilisée jusqu'en 2003 : contrairement à l'atrazine, elle semble ne pas avoir laissé de traces ; cependant, ses métabolites GS-11354 et GS-11355 et ses formes oxydées NOA423271 (sulfoxyde) et NOA428383 (sulfone) n'ont pas été recherchés. De même, apparemment pas de trace pour l'asulame, herbicide régulièrement utilisé jusqu'en 2012, car comme pour l'amétryne, son principal métabolite, le sulfanilamide, n'a pas été recherché.

Parmi les cas de recherche négative : les deux autres métabolites du diuron (le 1-(3,4-dichlorophényl)-urée et le 1-(4-isopropylphényl)-urée), le piclorame, débroussaillant voisin du triclopyr et le glufosinate (désherbant total utilisé en traitement dirigé sous la canne). Les résultats négatifs concernent aussi d'autres herbicides canne entrés en jeu plus récemment : la pendiméthaline (2005) ou l'isoxaflutole (2008). Cependant, l'isoxaflutole est quasiment indétectable car c'est un proherbicide qui en conditions humides libère son principe actif, le dicétonitrile (DKN), beaucoup plus mobile dans les sols ; or le DKN ne fait pas partie des 398 substances recherchées.

Le DKN n'est pas la seule substance pertinente absente de la liste des 398 substances recherchées au cours de la période mai 1999 - janvier 2010. Parmi les substances liées au désherbage de la canne à sucre et absentes de cette liste, il faut signaler, outre le TCA (*trichloroacetic acid*) retiré depuis longtemps, les deux métabolites de l'alachlore (alachlore ESA et alachlore OXA, respectivement pour *alachlor-ethanesulfonic acid*, et *alachlor-oxanilic acid*) et ceux du métolachlore (communs au S-métolachlore ainsi qu'à l'acétolachlore), à savoir le métholachlore ESA et le métolachlore OXA. Comme le déséthylatrazine vis-à-vis de l'atrazine, le métolachlore ESA est souvent rencontré dans les sols à des fréquences et des dosages plus élevés que le métolachlore. Enfin, parmi les substances non recherchées, deux herbicides entrés en jeu plus récemment : la mésotrione (2004), et le prosulfuron logiquement absent de cette liste car entré en jeu à La Réunion en 2013.

...S'AVÈRENT PARTICULIÈREMENT PERSISTANTES

Dans le cadre du projet Transfert Phytos, le BRGM a entrepris de caractériser les risques de pollution diffuse à partir de l'étude de deux des BAC prioritaires particulièrement pollués, celui de Sainte-Vivienne, sur le versant Est très pluvieux (> 3m/an), et celui de La Salette, sur le versant Ouest moins pluvieux (< 1m/an). Les risques seront évalués à partir de relevés de terrain sur les pratiques agricoles et de tests de laboratoire. Ces derniers visent à déterminer les dynamiques d'adsorption et de dégradation de quatre herbicides canne, et *in fine* leur GUS (*Groundwater ubiquity score*, Gustafson, 1989) à partir d'échantillons de sols représentatifs sur le plan agro-pédologique. Ces quatre herbicides sont le 2,4-D, le S-métolachlore, la métribuzine et le glyphosate ; herbicides historiques encore en usage, ils sont largement utilisés et ont quelques cas de dépassements à leur passif (respectivement 2 + 2 + 2 + 17, tableau II). Dans ce contexte, des échantillons d'eau spécifiques ont été prélevés mensuellement dans les deux BAC pour y traquer 106 pesticides ou leurs métabolites (essentiellement des herbicides) entre septembre 2011 et avril 2012. La liste des 106 n'est pas un strict sous-ensemble de la liste des 398, car elle inclut par exemple les deux métabolites du métolachlore, absents de la liste des 398.

Tableau II. Les herbicides quantifiés au dessus du seuil de potabilité (0,1 µg/l). Pollution des eaux (ESU + ESO) à La Réunion, période 1999-2010.

Herbicides found in water at concentrations > 0.1 ppb, Reunion Island, 1999-2010.

#H	#HCAS		quantifications (Qt)		quantifications > 0.1 µg (Qs)		Qs/Qt
			nombre de cas	%	nombre de cas	%	
		Rappel : tous pesticides	1406	100.0%	251	100.0%	18%
		dont herbicides	1320	93.9%	217	86.5%	16%
		dont liés au désherbage de la canne à sucre	1245	88.5%	200	79.7%	16%
1	1	atrazine + DEA + DIA	950	67.6%	152	60.6%	16%
2	2	diuron + son métabolite	181	12.9%	15	6.0%	8%
		sous-total atrazine + diuron	1131	80.4%	167	66.5%	15%
3	3	glyphosate + son métabolite (partiellement CAS)	20	1.4%	17	6.8%	85%
4	4	hexazinone (ex CAS)	35	2.5%	7	2.8%	20%
5		bentazone	17	1.2%	4	1.6%	24%
6		2,4-MCPA (prairies, prochainement CAS)	3	0.2%	3	1.2%	100%
7	5	métolachlore + S-métolachlore (CAS + divers)	32	2.3%	2	0.8%	6%
8	6	bromacil (ex CAS)	32	2.3%	2	0.8%	6%
9	7	2,4-D (CAS + maïs + prairies)	15	1.1%	2	0.8%	13%
10		métazachlore	6	0.4%	2	0.8%	33%
11		aminotriazole	5	0.4%	2	0.8%	40%
12	8	métribuzine (CAS + tomate + pomme de terre)	2	0.1%	2	0.8%	100%
		sous-total [hexazinone - métribuzine]	147	10.5%	26	10.4%	18%
13	9	triclopyr (débroussaillant, bordures CAS)	8	0.6%	1	0.4%	13%
14		monuron	4	0.3%	1	0.4%	25%
15		isoproturon	4	0.3%	1	0.4%	25%
16		terbutryne	1	0.1%	1	0.4%	100%
17	10	paraquat (partiellement ex CAS)	1	0.1%	1	0.4%	100%
18		bromoxynil	1	0.1%	1	0.4%	100%
19		prométryne	1	0.1%	1	0.4%	100%
		sous-total [triclopyr - prométryne]	20	1.4%	7	2.8%	35%

CAS : canne à sucre, #H : nombre d'herbicides, #HCAS : nombre d'herbicides CAS

Douze substances ont été quantifiées (tableau III), toutes liées aux herbicides, principalement des herbicides canne (à l'exception du dinoterbe, et partiellement du glyphosate). La persistance du problème atrazine, et dans une moindre mesure diuron, hexazinone et même bromacil, qui sont des herbicides hors jeu depuis 2003 ou 2007-2008, est confirmée, y compris dans les ESU. Un résultat positif à l'amétryne a même été enregistré dans les ESU de Sainte-Vivienne, alors qu'aucun résultat positif n'avait été enregistré au cours de la décennie antérieure (mais on ignore le nombre de recherches effectuées).

La persistance du problème atrazine presque dix ans après son retrait renvoie à l'inertie de ce phénomène de pollution. De même que la crue du fleuve Sénégal à son embouchure se prolonge un à deux mois après la fin de la saison des pluies, et que la glace formée au sommet de la mer de glace dans le massif du Mont Blanc ne parvient au bas du glacier que deux cents ans après sa formation à son sommet, une eau de drainage infiltrée aujourd'hui dans un sol agricole, en l'occurrence réunionnais, ne se retrouvera dans les eaux souterraines profondes exploitées par les forages que bien des années plus tard. Ces délais renvoient à la notion d'âge apparent de l'eau, ou de temps moyen de résidence des eaux souterraines, qui se chiffre en années. Des dosages de marqueurs chimiques (gaz dissous dans l'eau : CFC-12, CFC-113 et SF6) ont permis d'évaluer dans le cadre du projet Transfert Phytos les temps moyens de résidence des eaux profondes dans les deux BAC : il serait de 45 à 50 ans pour le forage F5 de la Salette et de 24 à 39 ans pour le forage F1 de Sainte-Vivienne (Petit *et al.*, 2013). L'atrazine ayant été utilisée pour la dernière fois en 2003, faudra-t-il attendre les années 2040-2050 pour que les occurrences de pollution à l'atrazine ou ses dérivés se raréfient ? A noter que la concentration en DEA est toujours supérieure à celle en A dans un rapport presque toujours supérieur à 2 (résultat non montré). Les variations saisonnières du rapport DEA/A sont intéressantes à suivre, et à mettre en relation avec la dynamique des nitrates pour une meilleure compréhension des risques de pollutions diffuses (observatoire-pesticides.gouv.fr).

Le tableau III confirme des occurrences de pollutions au métolachlore (systématiquement présent dans tous les prélèvements ESU de Sainte-Vivienne) et à la métribuzine, herbicides déjà utilisés à l'époque de l'atrazine et toujours en usage de nos jours à des doses plus faibles (Martin *et al.*, 2013 b). Les pollutions à l'atrazine, au bromacil, au diuron et à l'hexazinone plaident en faveur d'une origine lointaine des pollutions au métolachlore et à la métribuzine. Mais la vigilance s'impose avec ces deux produits encore en usage de nos jours.

Tableau III. Les 12 pesticides présents dans les eaux prélevées dans les BAC de Sainte-Vivienne (commune de Sainte-Suzanne) et de La Salette (commune de Saint-Pierre) entre septembre 2011 et avril 2012 dans le cadre du projet BRGM Transfert Phyto (prélèvements mensuels).
The 12 pesticides found in the two sites monitored between September 2011 and April 2012 by the Transfert Phyto BRGM project, Reunion Island.

	BAC de Sainte-Vivienne						BAC de la Salette	
	LQ (µg/l)	Forage F1 (ESO)		En aval de F1 (ESU)			Forage F5 (ESO)	
		nombre d'analyses	% de présence (> LQ)	nombre d'analyses	% de présence (> LQ)		nombre d'analyses	% de présence (> LQ)
1 atrazine	0.005	7	0%	7	100%		7	100%
2 déséthylatrazine	0.005	7	100%	7	100%		7	100%
3 désisopropylatrazine	0.005	7	0%	7	100%		7	100%
4 hexazinone	0.005	7	43%	7	100%		7	0%
5 métolachlore	0.005	7	14%	7	100%		7	14%
6 métolachlore ESA	0.01	7	0%	7	71%		6	0%
7 diuron	0.01	7	0%	7	57%		7	0%
8 métribuzine	0.005	7	0%	7	29%		7	0%
9 amétryne	0.005	4	0%	4	25%		4	0%
10 dinoterbe	0.1	4	0%	5	20%		4	0%
11 AMPA	0.05	6	0%	6	17%		6	0%
12 bromacil	0.01	4	0%	4	0%		4	25%
glyphosate	0.05	6	0%	6	0%		6	0%
2,4-D	0.01	6	0%	6	0%		6	0%
93 autres substances			0%		0%			0%

BAC : bassin d'alimentation de captage ; ESO : eaux souterraines ; ESU : eaux de surface . LQ : limite de quantification

Le tableau III fait état d'un seul cas de pollution à l'AMPA (métabolite du glyphosate) dans les ESU de Sainte-Vivienne. Le glyphosate est comme le métolachlore et la métribuzine un herbicide dont l'usage est déjà ancien, même si à l'époque de l'atrazine il était sans doute moins utilisé que de nos jours, le paraquat étant alors disponible. Le paraquat retiré en 2007 n'a d'ailleurs causé aucun cas de pollution à retardement dans cette étude particulière (1 seul cas dans le suivi décennal).

Le tableau III ne fait état d'aucun cas de pollution au 2,4-D, qui reste pourtant et de loin l'herbicide le plus utilisé en culture de canne à sucre. Ce résultat très partiel est à rapprocher des 18 analyses positives enregistrées par l'ARS, l'OLE et la DEAL au cours de la première décennie de suivi, sur un nombre d'analyses supérieur à 1770 ; parmi les 18 détections, 15 présences avérées et 2 légers dépassements en 2006 à 0,11 et 0,12 µg/l. Résultat à relativiser par rapport à la pression de plus d'un demi-siècle d'utilisation à très large échelle par les planteurs de canne à La Réunion. Cependant, il importe de maintenir la vigilance et le suivi de cet herbicide si populaire parmi les planteurs de canne, et secondairement parmi d'autres agriculteurs (éleveurs, producteurs de maïs).

Enfin, le tableau III ne fait état d'aucune pollution avec les herbicides canne les plus récents (mésotrione, 2004 ; pendiméthaline, 2005 ; isoxaflutole, 2008, mais indétectable, cf. *supra* ; fluroxypyr, 2011, trop récent). Cela ne préjuge en rien de leur éventuelle apparition dans un futur plus ou moins proche en raison des temps de transit de l'eau qui les transporte.

CONCLUSION

La forte inertie des phénomènes de pollution aux pesticides affectant les ressources en eau douce s'explique par l'âge moyen des eaux souterraines, entre leur entrée dans le sol, leur percolation dans

la zone non saturée via les pluies drainantes et leur prélèvement dans une source ou un forage. Dans le cadre du projet Transfert Phytos, le BRGM a estimé les temps moyens de résidence des eaux dans plusieurs situations à La Réunion : souvent plusieurs décennies. Le cas de l'impact à retardement des anciens herbicides canne à sucre à La Réunion est particulièrement démonstratif, avec notamment l'atrazine et le diuron, responsables à eux deux de 67 % des dépassements et 73 % des détections.

Cependant l'âge moyen des eaux affecte tous les herbicides de la même façon. Les risques de pollution diffuse sont liés d'une part aux quantités épandues et d'autre part aux caractéristiques intrinsèques des produits croisées avec les propriétés des sols en surface et les conditions d'application, en incluant les conditions météorologiques prévalant pendant les jours qui précèdent et suivent l'épandage.

A La Réunion, un aspect des risques de pollution diffuse est en cours d'évaluation par le BRGM sur les BAC prioritaires de Sainte-Vivienne et de la Salette à travers la détermination des dynamiques d'adsorption et de dégradation des herbicides et *in fine* de la détermination des indices GUS de quatre herbicides (*supra*) sur plusieurs types de sols représentatifs. Ces données viendront compléter celles de Bernard *et al.*, (2005) obtenues selon le même principe (détermination des indices GUS) mais avec une méthodologie différente, sur les périmètres irrigués mis alors en service dans la zone Ouest de La Réunion, sur deux types de sol exposés à cinq herbicides (dont le 2,4-D commun aux deux études).

A La Réunion, les risques de pollution diffuse sont également en cours d'évaluation par une équipe du CIRAD qui s'attache à estimer ces risques par modélisation pour un grand nombre d'herbicides (incluant tous les herbicides canne) et de types de sols par modélisation croisés par une typologie de conditions d'utilisation (Vélu *et al.*, à soumettre). L'approche est celle développée par l'équipe INRA de Colmar (méthode INDIGO, indicateurs Iphy). Il sera intéressant de rapprocher les résultats de Bernard *et al.*, (2005) avec ceux du BRGM, et les approches fondées sur la détermination biophysiques des indices GUS et la détermination par modélisation des indicateurs Iphy.

En attendant les résultats des institutions de recherche, l'ARS, l'OLE-OI et la DEAL continuent leur suivi sur la qualité des ressources en eau, les résultats sont consultables en ligne (www.reunion.eaufrance.fr), des synthèses annuelles sont proposées. Certaines substances qui seraient à incorporer à la liste des substances à traquer sont indiquées dans ce document. Le quotient DEA/A serait à établir pour chaque prélèvement (indicateur à rapprocher de références extérieures). Les concentrations en nitrates seraient à mettre en parallèle avec celles de l'atrazine et du DEA pour mieux en comprendre la dynamique. Pour les futures compilations, il serait souhaitable de considérer l'ensemble des analyses, y compris celles à résultat négatif, de manière à pouvoir calculer les fréquences de détection et de dépassement.

Simultanément, l'effort de formation en cours sur l'utilisation des pesticides conduit dans le cadre du plan ECOPHYTO (*'réduire et améliorer l'utilisation des phytos'*) se poursuit. Il devrait toucher la totalité des utilisateurs réunionnais d'ici octobre 2014. Ils seront alors titulaires du certificat individuel dit CERTIPHYTO, qui leur sera exigé à l'achat des produits phytosanitaires. Cette formation devrait surtout leur permettre de progresser significativement dans l'adoption des bonnes pratiques agricoles et phytosanitaires.

Simultanément, l'effort de recherche-développement-transfert sur les méthodes alternatives à l'utilisation des pesticides (Plan Ecophyto *'réduire l'utilisation des phytos'*) se poursuit avec deux projets Dephy Ferme (canne et mangue) en cours d'exécution et deux projets Dephy Expé (canne et maraîchage) en début d'exécution.

Simultanément, l'effort de recherche-développement sur l'optimisation de l'utilisation des herbicides canne en constante évolution se poursuit dans le cadre du 'réseau herbicides' soutenu par toute la filière (*'améliorer l'utilisation des phytos'*). Car améliorer l'efficacité malherbologique des traitements herbicides, c'est pouvoir en réduire durablement la consommation et la pression sur l'environnement (Martin & Esther, 2013).

REMERCIEMENTS

Le projet Transfert Phytos porté par le BRGM est co-financé par l'Office de l'eau Réunion et la DEAL de La Réunion. Les auteurs remercient l'Office de l'eau, la DEAL et l'ARS Océan Indien pour leur active collaboration, ainsi que le Cirad, eRcane, Tereos Océan Indien et la DAAF Réunion pour leur constructive participation au comité du pilotage du projet.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Bernard H., Chabalière P.-F., Chopart J.-L., Legube B., Vauclin M., 2005 - Organic compounds in the environment. Assessment of herbicide lixiviation risk in two tropical soils of Reunion Island (France). *J. Environ. Qual.*, 34 :534-543.

Boyer de la Giroday E., 1977 – Introduction. *In : Les principales adventices de la canne à la Réunion*. CERF (Centre d'Etude, de Recherche et de Formation) - Syndicat des fabricants de sucre, Saint-Denis, La Réunion, France. 81 p.

Côte F.-X., Chabrier C., Domergue R., Fouré, E., Fournier P., Galan M.-B., Laplace D., Marnotte P., Pavis C., Simon S., Vannière H., 2011 - Pesticides DOM : Inventaire des dispositifs expérimentaux. *Cirad, Inra, DAAF Guyane, Ministère de l'Agriculture et Onema eds.*, Montpellier, France, 283p.

DAAF de La Réunion, 2012 - Mémento agricole et rural de La Réunion
<http://www.daaf974.agriculture.gouv.fr/Memento-agricole-et-rural,52> (consulté le 19/07/2013)

Grossard F., Marion D., Jean-Baptiste I., Grolleau O., Martin J., 2012 a – La situation phytosanitaire de la canne à sucre dans départements d'outre-mer (Guadeloupe – Martinique – Réunion). Problématique du désherbage. CTCS Guadeloupe, eRcane, CTCS Martinique, CIRAD Réunion. 32p.

Gustafson D.I., 1989 - Groundwater ubiquity score: a simple method for assessing pesticide leachability. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 8: 339-357.

Martin J., Maillary L., Thomas P., Gossard C., 2013 a – L'IFT herbicides canne à sucre à La Réunion : premières estimations. *In : cette conférence*.

Martin J., Grossard F., Marnotte P., Grolleau O., Esther J.-J., 2013 b – Le chassé-croisé des retraits-homologations d'herbicides canne à sucre à La Réunion : premières estimations. *In : cette conférence*.

Martin J. & Esther J.-J., 2013 – Optimiser l'utilisation des herbicides canne à sucre à La Réunion. *In : cette conférence*.

Petit V., Aunay B., Gourcy L., Baran N., Oliva Z., Lucas C., 2013 – Pollution diffuse et transferts des produits phytosanitaires du sol vers les ressources en eaux souterraines de l'île de La Réunion. Synthèse des données. Phase 1. Rapport final. BRGM/RP-61477-FR, 171p, 100 fig.

Vélu A., Le Bellec F., Fournier P., Hardy C., Michels T. - How to help farmers to decrease herbicide environmental impacts. *Ecological Indicators*, à soumettre 10/2013

<http://www.observatoire-pesticides.gouv.fr/index.php?pageid=348> (consulté le 19/07/2013)

<http://www.reunion.eaufrance.fr/index.php?id=104> (suivi des pollutions diffuses).